



Effacité conservatoire des arbres de rétention en contexte de changement climatique

Métaprogramme BIOSEFAIR

Bilan de projet : 2024 - 2026

janvier 2026

La rétention d'arbres-habitats pérennes, épargnés par les coupes, est une recommandation en faveur de la biodiversité forestière. Les changements climatiques en cours exposent ces arbres à des stress accrus (sécheresse, canicule, parasites et phytophages) entraînant des dépérissements, en particulier au sein de trouées en régénération. Les gestionnaires s'interrogent sur l'efficacité des arbres de rétention dans ces situations : les espèces forestières associées peuvent-elles réaliser leur niche si l'arbre dépérit rapidement ?

À l'interface forêt-atmosphère, les houppiers sont les premiers exposés aux rayons du soleil : par le haut s'ils sont en peuplement fermé, sur toute la hauteur s'ils sont isolés ou en lisière. Leur défoliation risque de modifier la structuration spatiale du microclimat forestier. Nous faisons l'hypothèse que les houppiers partiellement défoliés des arbres dépérissants réduisent l'effet tampon du couvert forestier sur le microclimat du sous-bois, ainsi que les écarts de température et d'humidité entre les couronnes internes et externes des houppiers.

Le projet vise à (i) décrire l'étagement des microclimats et des communautés dans les arbres (aspects méconnus dans les houppiers), (ii) identifier les facteurs pouvant influencer cet étagement, avec des hypothèses sur l'état

sanitaire, l'essence, la position de l'arbre en cœur ou bordure d'îlot et taille de l'îlot, (iii) réaliser les développements méthodologiques nécessaires à l'acquisition des données en canopée.

Le projet repose sur 3 questions écologiques et 3 questions méthodologiques.

D'un point de vue écologique, comment les variables micrométéorologiques (température et humidité relative de l'air) et la biodiversité épiphyte (bryophytes, champignons lignicoles) se structurent-elles dans le houppier et sur le tronc, selon que l'on est sur chênes sessiles sains vs. dépérissants (question E1), sur chênes sessiles vs. pédonculés (question E2), sur chênes sessiles en bordure vs. en cœur d'îlot, et selon la taille de l'îlot (question E3) ?

D'un point de vue méthodologique, l'acquisition des données a nécessité le prototypage et le déploiement d'un système de mesure de variables microclimatiques en 8 points de l'arbre sur un double gradient vertical (4 points le long du tronc) et horizontal (4 points dans le houppier, 2 en couronne interne et 2 en couronne externe), autonome pour mesurer et télétransmettre les données sur une année à raison d'une mesure toutes les heures : le prototype DC, système filaire sur le principe du daisy-chaining a été déployé sur tous les arbres échantillonnés (question M1), et comparé sur un des arbres à la solution μ Pi, sans fil (Question M2). Enfin, un test de capteurs automatiques de spores de bryophytes et champignons, potentiellement utile pour des inventaires en canopée, a été réalisé pour preuve de concept (question M3).

Les données du gradient sanitaire ont été acquises en 2024 sur 6 paires de chênes sains/dépérissants, en peuplements adultes fermés (forêts domaniales de Vierzon et Tronçais). La question E2 sera traitée sur les données bryologiques en base de tronc seulement. Les données sur 20 arbres en cœur ou bordure d'îlots sont en cours d'acquisition (2025-2026) en forêts domaniales de Vierzon, Orléans et Saint-Palais. Les variables micrométéorologiques de 2024 ont été analysées par modèles linéaires généralisés à effets mixtes (effets de la position dans l'arbre, de l'état sanitaire ou de leur interaction), de même que la richesse bryologique (effets seuls ou en interaction de la position, l'état sanitaire, les variables micrométéorologiques). La composition des cortèges de bryophytes a été analysée par Analyse Canonique des Correspondances.

Ces premiers résultats ont été discutés le 3 décembre 2025 en atelier réunissant les partenaires du projet, des gestionnaires forestiers (4 CNPF, 2 DSF, 7 ONF), d'autres chercheurs d'INRAE (URFM, ISPA, PIAF, LESSEM) ou d'autres instituts (laboratoire EDYSAN – Université de Picardie). Les apports des différentes disciplines ont permis d'identifier des acquis appréciés, des points d'amélioration (design expérimental, formulation des hypothèses ou manière de traiter les données), des manques (variables non prises en compte dans l'échantillonnage), des ressources à mobiliser. De nombreux points restent à étudier pour évaluer en quoi les évolutions climatiques et les dépérissements influencent l'efficacité des pratiques de rétention et identifier les recommandations pratiques les plus adaptées.

Résultats détaillés

En janvier 2026, les données sont encore en cours d'acquisition pour les questions E3 (dispositif installé en mars 2025, acquisition des données micrométéorologiques à poursuivre jusqu'en juin 2026) et M2 (dispositif installé en octobre 2025, enregistrements de données jusqu'en juin 2026). Les données de la question E2 limitées aux relevés de bryophytes en base de tronc seront analysées ultérieurement.

Déploiement du prototype DC (question M1) : les difficultés nous ont fait progresser

Le prototype DC développé en début de projet (question M1) a été déployé sur les échantillonnages des questions E1 et E3, avec de nombreuses difficultés. Dans ce prototype, les capteurs (de température, rayonnement lumineux et humidité relative de l'air) sont regroupés dans des boîtiers (nodes), montés en série selon le principe du daisy-chaining et

ainsi reliés par câble à une station d'enregistrement, dont les batteries sont alimentées par panneau solaire fixé au-dessus de l'arbre sur un mât Canopix développé par l'unité EFNO.

Difficultés pré-installation : La taille des arbres à équiper impliquait des distances inter-nodes plus élevées que celles pour lesquelles est conçu le protocole I2C de communication : il a fallu programmer une amplification de signal à l'aide de micro-contrôleurs. Pour sécuriser l'acquisition des données, des capteurs du marché ont été acquis pour doubler les nodes (avec adaptation pour permettre le déchargement des données de ces capteurs, non prévus pour cela). Pour éviter tout dégât de vandalisme ou de sanglier, seul le capteur du marché a été installé en base de tronc.

Difficultés post-installation : Différents soucis matériels sont advenus : perturbation dans l'enregistrement des données pour la station d'acquisition qui regroupait les enregistrements de 24 capteurs, réseau mobile en forêt mauvais qui complique les transmissions de données et le suivi à distance, dataloggers internes qui enregistrent les données à comportements erratiques après arrêt des stations (en cas de coupure de tension par exemple), capteurs de base du tronc n'ayant enregistré que sur une période partielle (panne de batterie ou manque de place sur la carte d'enregistrement).

En conséquence, les données micrométéorologiques 2024 sont lacunaires (défaut d'enregistrement, décalages de lignes), la période sur laquelle les données sont complètes pour les 12 arbres se réduit à un mois (du 8 juillet au 8 août) alors que les capteurs étaient en place de mi-juin à fin octobre.

Les points positifs :

Le prototype DC développé remplit les critères de :

- télétransmission dans les deux sens (gestion à distance)
- modularité et évolutivité (nombreux points de mesure possibles, différents types de capteurs assemblables entre eux, possibilité d'assembler des capteurs tiers via l'interface I2C, nodes réutilisables dans d'autres configurations pour de futurs projets). Le système de guirlandes de nodes en série permet de s'adapter à des arbres de grande taille : chaque nouveau node prolonge la guirlande sans avoir besoin d'être relié directement à la station d'enregistrement (d'où réduction de la longueur totale de câbles).
- répliquabilité (accès au plan de montage, logiciel open source accessible)
- pérennité (système autonome, ne dépend pas d'abonnement ni de licences propriétaires)
- indépendance (chargement des données sur serveur propre à INRAE).

Questions E1 et E2 : Des ambitions d'échantillonnage revues à la baisse

Le retard pris à l'installation nous a conduits à revoir nos ambitions à la baisse :

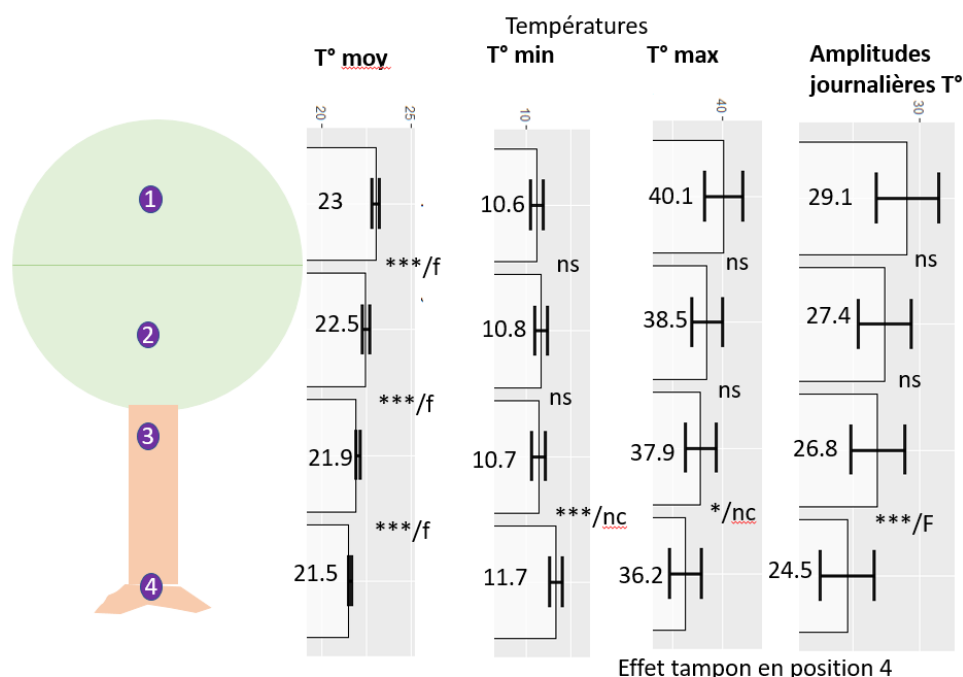
- E1 : 6 paires d'arbres sains/dépérissants au lieu de 8, guirlande horizontale de nodes dans le houppier pour 4 arbres (3 dépérissants et 1 sain). Au bilan, les données micrométéorologiques sont exploitables pour la guirlande verticale (4 positions le long du tronc), pour 6 répétitions, et sont complètes pour la période du 8 juillet au 8 août 2024.
- E2 : le manque de chênes pédonculés appariables à des chênes sessiles de même état sanitaire et le manque de temps pour mettre en place les guirlandes de capteurs nous ont conduits à abandonner cette question. Les 5 paires pédonculé-sessile identifiées lors de la

prospection ont fait l'objet d'un inventaire de bryophytes sur les 2 premiers mètres à la base du tronc, ces données complètent utilement un jeu de données similaires déjà existant, qui atteindra ainsi le nombre nécessaire de répétitions pour être analysé.

Premiers résultats sur le gradient sanitaire (question E1)

Les données de bryophytes sont disponibles sur les 8 positions (4 sur tronc, 4 sur branches du houppier), les variables micrométéorologiques sur les 4 positions du tronc pour la période du 8 juillet au 8 août 2024. Les prélèvements de champignons ont été réalisés mais les données d'ADNe ne sont pas encore disponibles.

C'est avant tout la position dans l'arbre qui explique les variables micrométéorologiques et révèle un effet tampon net en position 4



L'état sanitaire exacerbe les différences micrométéorologiques entre positions (différences plus fortes en état déperissant pour certaines variables, en état sain pour d'autre) mais il y a très peu d'effets directs de l'état sanitaire sur les variables mesurées en chaque position.

Pour les bryophytes (une trentaine d'espèces), le déperissement des arbres entraîne une baisse de richesse de plus de 10% en haut du tronc et en couronne extérieure sud. En outre, les différences de richesse selon la position dans l'arbre, non significatives dans les arbres sains, sont fortes dans les arbres déperissants. Au-delà de cette interaction entre position et état sanitaire, c'est l'amplitude journalière de température en interaction avec l'état sanitaire qui explique le mieux la richesse en bryophytes, avec un effet négatif d'autant plus fort que l'arbre est sain. Enfin, l'ACC révèle des associations d'espèces bien différenciées entre haut du tronc, base du tronc, et reste du houppier. Nous avons eu la surprise de trouver fréquemment en houppier une espèce rarement trouvée en sous-bois : *Frullania fragilifolia*.

Comparaison des deux solutions (prototype C et solution μ Pi)

En cours. La solution μ Pi (développée par les unités ISPA et BIOGECO, sous forme d'un réseau sans fil de microcontrôleurs ESP32 communiquant par Wifi) a été adaptée et présentée au séminaire du 3 décembre 2025. Elle est installée sur un arbre de l'échantillonnage 2025 pour comparer les deux solutions sur une période de mesure étendue (octobre 2025-mai 2026).

Comparaison de capteurs passifs de spores (M3)

L'expérimentation (5 réplicats) a consisté à projeter des spores de sclérodermes dans une chambre étanche munie de ventilateurs et contenant 5 types de pièges passifs (écorce nue de chêne sessile, coussinet de mousses épiphytes, lame enduite de vaseline, bande adhésive, rouleau d'éponge passé sur coussinet de mousses épiphytes). Les pièges étaient ensuite placés dans de l'eau déminéralisée et agités pour que les spores se détachent, avant extraction d'ADN du liquide. Nous n'avons pas trouvé de différence significative de quantités d'ADN ou de densités des spores (comptées au microscope) entre pièges. En revanche, l'amplification PCR de l'ITS2 fongique dépend significativement du type de piège et varie selon la quantité de spores introduites (1 ml ou 5 ml) : les pièges naturels (épiphytes et écorce nue) sont aussi efficaces que les pièges à adhésif et vaseline, lesquels sont plus efficaces que le piège à rouleau.

Dispositif installé pour la question E3

Après discussion avec les gestionnaires pour clarifier les critères de choix des îlots (peuplements de chênes matures, de forme compacte, entièrement entourés de jeunes peuplements < 7 m de hauteur) et éviter toute confusion sémantique avec les îlots au sens statutaire employé en gestion (îlots paysagers, de vieillissement, de sénescence, notamment), nous avons sélectionné 10 îlots, en forêts d'Orléans, Saint-Palais et Vierzon, sur un gradient de tailles compris entre 0,45 et 7 ha. Nous avons équipé 2 arbres par îlot (en bordure et en cœur) avec le prototype DC de mesures micrométéorologiques. Les données (micrométéorologie, bryophytes et champignons) seront acquises en 2026.

Les discussions en séminaire de fin de projet ont identifié des points importants à considérer pour l'interprétation des résultats et des données supplémentaires à acquérir pour cela (historique de gestion de l'îlot, caractérisation dendrométrique de l'îlot et du jeune peuplement, caractérisation stationnelle, vitesse du vent).

Apports et conclusions du séminaire de restitution-discussion des premiers résultats

Ce séminaire a réuni plus de 30 participants, dont 22 en présentiel : partenaires du projet, gestionnaires forestiers (4 CNPF, 2 DSF, 7 ONF), autres chercheurs d'INRAE (URFM, ISPA, PIAF, LESSEM) ou d'autres instituts (laboratoire EDYSAN – Université de Picardie). Il a permis d'enrichir la vision et les premiers résultats du groupe projet par le regard d'experts de plusieurs disciplines : sylviculture, gestion forestière, entomologie, bryologie, santé des forêts, écologie forestière, écophysiologie des arbres, dendrométrie, phytoécologie, micrométéorologie. Leurs apports ont permis d'identifier des acquis appréciés du projet, même s'il reste encore de nombreux points à étudier pour répondre à toutes les questions des gestionnaires, des points d'amélioration (design expérimental, formulation des hypothèses ou manière de traiter les données), des manques (variables non prises en compte dans l'échantillonnage, par exemple), des ressources à mobiliser (équipes travaillant sur des sujets similaires, méthodes).

Perspectives scientifiques.

Sur les aspects méthodologiques, les équipes qui ont développé les deux solutions (DC et μ Pi) vont poursuivre la collaboration pour améliorer leurs solutions. Dans le cas des îlots cernés de peuplements en régénération, la vitesse du vent serait une mesure utile, susceptible

d'être différente en cœur et en bordure et d'influencer les températures et humidités relatives de l'air.

Concernant la complétude des données micrométéorologiques : des algorithmes permettent de combler des jeux de données sur des périodes d'une dizaine de jours. Pour les bryophytes, la période de données complètes disponible en 2024 (8 juillet - 8 août) a du sens par rapport à l'écologie et à la biologie des bryophytes : c'est a priori la période pendant laquelle les variables micrométéorologiques atteignent les valeurs limitantes pour ces organismes. Mais des données sur des périodes plus longues seraient préférables.

Concernant les méthodes d'analyses des données écologiques, le séminaire de fin de projet a identifié plusieurs pistes d'amélioration :

- pour l'effet de l'état sanitaire, remplacer la variable factorielle à deux niveaux (sain vs. dépérissant, définis arbitrairement de part et d'autre de la note Deperis D) par une variable factorielle à plusieurs niveaux (les classes Deperis), ou par des variables quantitatives continues (% de déficit foliaire ou valeur des composants de la note Deperis)
- analyser la diversité de traits des espèces de bryophytes
- ajouter en covariable des données d'environnement des arbres échantillonnés (diamètre, densité du sous-bois à proximité, taux de couvert, présence de dendromicrohabitats, par ex). Pour la densité de sous-bois, on pourrait utiliser les données LIDAR HD de l'IGN (calculer sur un rayon de 10 m autour de l'arbre la densité de points par strates)